

Характеристики планарных диодов терагерцового диапазона частот на основе сильно легированных GaAs/AlAs-сверхрешеток

© Д.Г. Павельев, Н.В. Демарина[¶], Ю.И. Кошуринов, А.П. Васильев*,
Е.С. Семенова*, А.Е. Жуков*, В.М. Устинов*

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия

* Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

(Получена 19 января 2004 г. Принята к печати 26 января 2004 г.)

Исследованы характеристики омических контактов на основе InGaAs в планарных диодах на полупроводниковых сверхрешетках с малой площадью активной области ($1-10 \text{ мкм}^2$). Диоды изготавливались на основе коротких (18 или 30 периодов) высоколегированных (10^{18} см^{-3}) GaAs/AlAs-сверхрешеток с шириной минизоны 24.4 мэВ. Величина приведенного сопротивления омического контакта при комнатной температуре составила $2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Показано, что свойства созданных планарных диодов позволят в дальнейшем использовать их в полупроводниковых приборах, функционирующих в терагерцовой области частот в широком диапазоне температур (4–300 К).

1. Введение

В настоящее время в неохлаждаемых полупроводниковых приборах гигагерцового диапазона частот широко применяются планарные полупроводниковые диоды с барьером Шоттки [1–7]. Однако применение диодов с барьером Шоттки в терагерцовом диапазоне требует увеличения предельной частоты работы диода f_p (частоты, определяющей верхнюю границу рабочего диапазона диода), что затруднено по причине ряда существующих ограничений. С одной стороны, предельная частота определяется непосредственно особенностями физических процессов, протекающих в полупроводниковой структуре: в частности, для диодов с барьером Шоттки инерционностью пролета электронами активной области. Так, время пролета для лучших диодов $\sim 1 \text{ пс}$ [6]. С другой стороны, предельная частота в значительной степени обусловлена влиянием паразитных емкости диода C и его последовательного сопротивления R_s ($f_p = 1/2\pi R_s C$), состоящего из сопротивления толщи полупроводника, контактных соединений и выводов диода. Емкость диода с барьером Шоттки с площадью активной области в единицах квадратных микрон в настоящее время составляет не менее 3 фФ [4–6], а уменьшение последовательного сопротивления диода путем увеличения легирования полупроводника ограничено значением концентрации $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [5,6].

Более короткие времена отклика и меньшие величины значений емкости могут быть достигнуты путем создания планарных диодов на основе полупроводниковых сверхрешеток [8,9]. Сверхрешетки обладают также вольт-амперной характеристикой с отрицательной дифференциальной проводимостью [10], которая сохраняется вплоть до частот выше 1 ТГц [11]. Совокупность этих свойств делает сверхрешетки весьма привлекательным объектом исследований, так как изготовленные на их

основе генераторы и умножители частоты, а также детекторы и смесители могут послужить основой новых твердотельных источников и приемников электромагнитных колебаний терагерцового диапазона частот.

Повышение предельной частоты диодов на сверхрешетках за счет уменьшения последовательного сопротивления диода требует повышения степени легирования структуры и уменьшения ее длины. Уменьшения емкости можно добиться уменьшением площади активной области диода. Последнее в свою очередь неминуемо ведет к нежелательному увеличению последовательного сопротивления диода за счет увеличения сопротивления омического контакта к сверхрешетке. Для сверхрешеток на основе гетеропары GaAs/AlAs в качестве омического контакта применяется эвтектика Au–Ge [8,9,12], которая напыляется (с последующим вжиганием) на сильно легированный слой n^+ -GaAs. Сплав Au–Ge образует с n^+ -GaAs при комнатной температуре контакт, характеризующийся величиной приведенного сопротивления (произведение сопротивления контакта на его площадь) не менее $10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$ [13–15], что обусловлено неоднородностями сплавного слоя [13]. Применение таких контактов в диодах с малой площадью активной области (единицы квадратных микрометров) приводит к значительному увеличению последовательного сопротивления диодной структуры.

В данной работе исследуется возможность снижения контактного сопротивления планарных диодов, изготовленных на основе высоколегированных GaAs/AlAs короткопериодных сверхрешеток, путем использования при формировании омических контактов слоя тройного соединения InGaAs, выращенного методом молекулярно-лучевой эпитаксии. Приводится методика определения приведенного сопротивления омического контакта малой площади. Показано, что значение приведенного сопротивления таких контактов составляет в среднем $2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$.

[¶] E-mail: demarina@rf.unn.ru

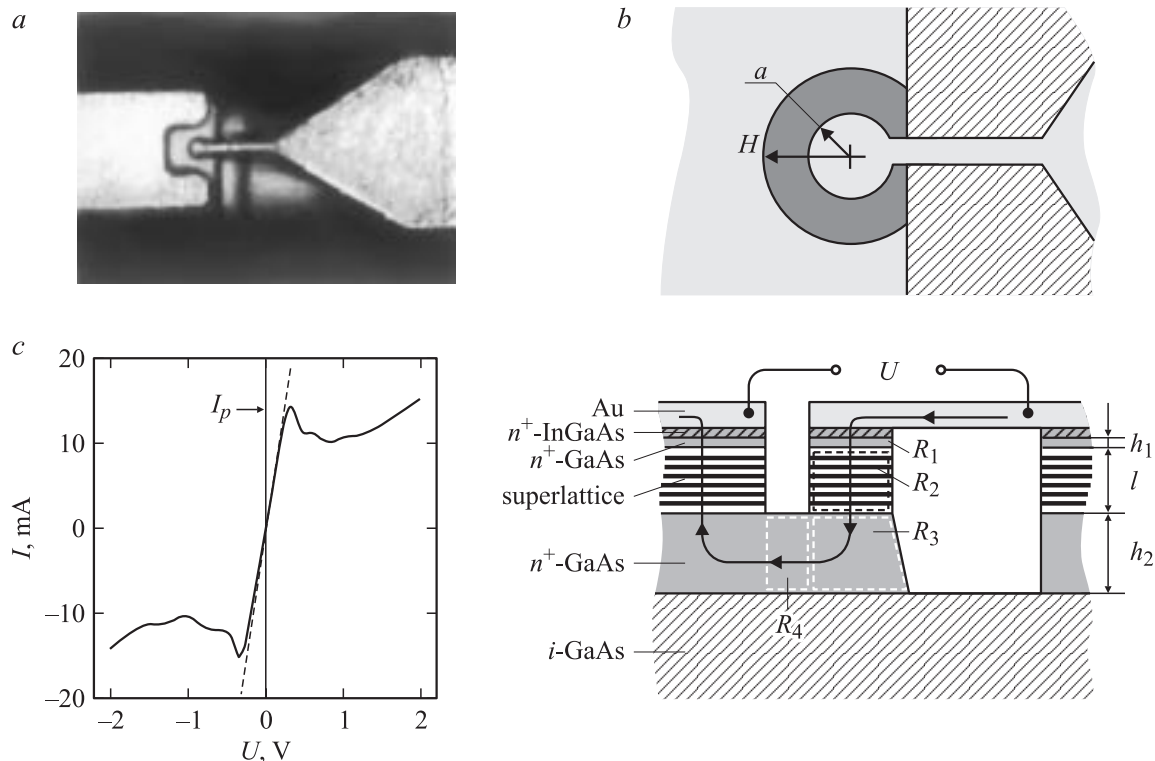


Рис. 1. Планарный диод на основе GaAs/AlAs-сверхрешетки. *a* — микрофотография планарного диода. *b* — схематическое изображение планарного диода: вид сверху (верхняя часть) и поперечное сечение диодной структуры (нижняя часть). *c* — вольт-амперная характеристика планарного диода, выполненного на сверхрешетке, состоящей из 18 периодов с площадью активной области 5 мкм^2 .

2. Объект исследования

Для исследований были изготовлены планарные диоды на основе GaAs/AlAs-сверхрешеток с малой площадью активной области ($1\text{--}10 \text{ мкм}^2$). На рис. 1, *a* представлена микрофотография планарного диода. Схематическое изображение диода (вид сверху и поперечное сечение) приведено на рис. 1, *b*. На полуизолирующем слое GaAs были последовательно выращены сильно легированный слой n^+ -GaAs (концентрация донорной примеси $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$), GaAs/AlAs-сверхрешетка с градиентными слоями, отделяющими ее от слоев n^+ -GaAs, сильно легированный слой n^+ -GaAs (концентрация донорной примеси $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$) и слой InGaAs (мольная доля InAs и концентрация донорной примеси линейно меняются по толщине слоя от 5 до 50% и от $6 \cdot 10^{18}$ до 10^{19} см^{-3} соответственно). Через фоторезистивную маску электрохимическим осаждением на полупроводниковую структуру наносилась металлизация (Au) выводов диода.

Сверхрешетки состояли из 18 или 30 периодов, что соответствует длинам 0.112 и 0.186 мкм соответственно. Каждый период включал 18 монослоев GaAs (потенциальная яма для электронов) и 4 монослоя AlAs (потенциальный барьер) и составлял 6.22 нм. Ширина первой минизоны сверхрешетки оценивалась с исполь-

зованием модели Кронига–Пенни [16] с модифицированными граничными условиями [17] и составляла 24.4 мэВ. Сверхрешетка была легирована донорной примесью с концентрацией 10^{18} см^{-3} . Заметим, что использование сверхрешеток с большей шириной барьера привело бы к увеличению сопротивления диода и малым значениям протекающих через него токов. Исследование таких сверхрешеток не представляет интереса для целей создания на их основе приборов, работающих в широком частотном диапазоне. Уменьшение ширины барьера в свою очередь приводит к уменьшению сопротивления сверхрешетки, в результате чего большая часть приложенного к диоду напряжения падала бы на последовательном сопротивлении диода.

Исследуемые структуры выращивались методом молекулярно-лучевой эпитаксии в установке Riber 32P на полуизолирующих подложках GaAs с ориентацией (100). Скорости роста бинарных компонент AlAs и GaAs калибровались с помощью исследования рентгеновских кривых качания в широком угле вблизи рефлекса (004) от тестовых GaAs/AlAs-сверхрешеток. Скорости роста составляли около 1 монослоя/с для GaAs и 0.5 монослоя/с для AlAs. В качестве легирующей донорной примеси использовался Si.

Изготовленный планарный диод имел в своей структуре два омических контакта разной площади, распо-

женных на верхней границе сверхрешетки параллельно ее слоям. При подаче напряжения U на такой диод (рис. 1, *b*) ток I протекает из омического контакта малой площади через высоколегированный n^+ -слой GaAs, сверхрешетку, потом второй высоколегированный n^+ -слой GaAs и опять же через сверхрешетку втекает в омический контакт большей площади. На изображении поперечного сечения диода (рис. 1, *b*, нижняя часть) направление протекания тока показано стрелкой.

3. Методика определения параметров диода

Использование метода длинной линии [18] для измерения сопротивления омических контактов приведет к занижению значений контактного сопротивления диодных структур, связанное, например, с тем, что размеры неоднородностей, возникающих на границе раздела металл–полупроводник, оказываются сравнимыми с диаметром контакта, в результате чего их вкладом в контактное сопротивление нельзя пренебрегать. Четырехточечный метод [18] потребует создания контактов такой же малой площади, как и в случае диода, что, с одной стороны, трудоемко, а с другой — в силу сложности технологического процесса не гарантирует получения контактов со свойствами, сходными с характеристиками контактов диода. Поэтому для определения сопротивления омического контакта использовались изготовленные диоды, а именно, напряжение, приложенное к диоду, выражалось через протекающий через него ток и сопротивление диода. Расчет и измерение сопротивлений различных участков диодной структуры позволили найти сопротивление омического контакта малой площади.

Выражение для напряжения, приложенного к диоду, имеет вид

$$U = IR, \text{ где } R = R_K + R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_p. \quad (1)$$

Таким образом, суммарное сопротивление диода R складывается из сопротивления R_K омического контакта радиуса a , сопротивления сверхрешетки малой площади R_2 , сопротивлений R_1 , R_3 и R_4 n^+ -слоя и сопротивления контактной системы, состоящей из двух подвижных зондов и подводящих проводов, R_p . Сопротивление сверхрешетки R_2 включает в себя сопротивление регулярной сверхрешетки R_{SL} и сопротивление градиентных слоев R_{gr-SL} , т.е. $R_2 = R_{SL} + R_{gr-SL}$. Градиентный слой представляет собой последовательность чередующихся слоев GaAs и AlAs с шириной слоя, соответственно уменьшающейся или увеличивающейся при переходе от n^+ -слоя к регулярной сверхрешетке. Сопротивлением сверхрешетки и n^+ -слоя, расположенных под омическим контактом большей площади, так же как и самим сопротивлением этого контакта, можно пренебречь из-за их большой площади поперечного сечения (по сравнению со вторым контактом). Из соотношения (1) видно, что

для нахождения R_K необходимо определить R , R_{SL} , R_{gr-SL} , R_1 , R_3 , R_4 и R_p .

Общее сопротивление R определялось по вольт-амперной характеристике планарного диода. Типичная зависимость тока диода от приложенного напряжения приведена на рис. 1, *c*. С ростом напряжения ток нарастает до некоторого максимального значения, дальнейшее увеличение напряжения сопровождается скачкообразным уменьшением тока. Это, вероятно, свидетельствует о том, что электрическое поле в структуре сверхрешетки, которое было однородным при малых приложенных напряжениях, становится неоднородным, т.е. в структуре появляется область сильного поля (домен), который может быть как статическим, так и распространяющимся. Начальный участок вольт-амперной характеристики аппроксимировался линейной зависимостью (рис. 1, *c*), которая определяла величину суммарного сопротивления диода при малых напряжениях.

Сопротивления R_1 , R_3 и R_4 , обусловленные высоколегированным n^+ -слоем под контактом и в области между контактами, вычислялись по формулам [3]:

$$R_1 = \rho_{n^+} \frac{h_1}{\pi a^2}, \quad R_3 = \frac{\rho_{n^+}}{2\pi a} \operatorname{arctg} \frac{h_2}{a} + \frac{\rho_{n^+}}{4\pi h_2},$$

$$R_4 = \frac{\rho_{n^+}}{(4/3)\pi h_2} \ln \frac{H}{a}, \quad (2)$$

где ρ_{n^+} — удельное сопротивление n^+ -слоя, h_1 и h_2 — толщина n^+ -слоя над и под сверхрешеткой соответственно, H — расстояние от центра омического контакта малой площади до края контакта большей площади (рис. 1, *b*).

Сопротивление контактной системы R_p оценивалось экспериментально и составило 2.5 Ом.

Для определения сопротивления сверхрешетки методом Монте-Карло [19] рассчитывалась зависимость дрейфовой скорости электронов от напряженности электрического поля. В качестве основных механизмов рассеяния рассматривалось рассеяние электронов на акустических фононах, полярных оптических фононах, атомах ионизированной примеси и несовершенствах границ раздела между слоями. Вероятность рассеяния электрона рассчитывалась по „золотому“ правилу Ферми [20] с использованием для описания взаимодействия электронов с акустическими и полярными оптическими фононами и атомами ионизированной примеси матричных элементов для объемного GaAs [21,22]. Для расчета вероятности рассеяния на несовершенствах границ раздела между слоями сверхрешетки использовалась традиционная модель, описанная, например, в [23]. Полная частота рассеяния, необходимая для расчета времени свободного пробега при моделировании движения электрона методом Монте-Карло, рассчитывалась путем интегрирования вероятности рассеяния по всем возможным конечным состояниям электрона с учетом дисперсионного соотношения для энергии электронов в

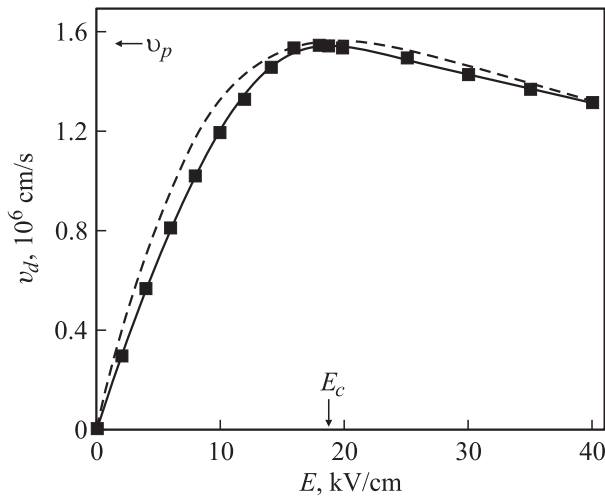


Рис. 2. Зависимость дрейфовой скорости электронов v_d от напряженности электрического поля E в рассматриваемой сверхрешетке, рассчитанная методом Монте-Карло (сплошная линия) и ее аппроксимация по формуле (4) (штриховая линия).

сверхрешетке

$$\varepsilon = \frac{\Delta}{2} (1 - \cos k_z d) + \frac{\hbar^2}{2m} (k_x^2 + k_y^2), \quad (3)$$

где k_z и k_x, k_y — компоненты волнового вектора электрона, соответственно параллельная и перпендикулярные оси сверхрешетки, Δ — ширина минизоны, d — период сверхрешетки, m — эффективная масса электрона для движения в направлении, перпендикулярном оси сверхрешетки, \hbar — постоянная Планка.

Возможность рассеяния электронов в соседние минизоны Бриллюэна учитывалась при расчете общей частоты рассеяния, когда интегрирование по всем возможным конечным состояниям электрона в пространстве обратной решетки проводилось не только по первой минизоне Бриллюэна, а также по соседним минизонам. Все параметры материала, необходимые для расчета частот рассеяния, выбирались такие же, как для объемного GaAs [18].

Полученная полескоростная характеристика приведена на рис. 2. Уменьшение дрейфовой скорости электронов, v_d , при напряженности электрического поля больше критической (E_c) обусловлено способностью электронов в пространстве обратной решетки достигать края минизоны Бриллюэна, где они претерпевают брэгговское отражение. Рассчитанная характеристика аппроксимировалась зависимостью, подобной предложенной ранее Эсаки и Цу [10]:

$$v_d(E) = 2v_p \frac{(E/E_c)}{1 + (E/E_c)^{1.7}}, \quad (4)$$

где E — напряженность электрического поля, критическое поле $E_c = 19$ кВ/см, $v_p = 1.5 \cdot 10^6$ см/с — максимальная дрейфовая скорость электронов в сверхрешетке.

Дрейфовая подвижность носителей заряда в электрическом поле может быть записана в виде

$$\mu_d = \frac{dv_d(E)}{dE} = 2 \frac{v_p}{E_c} \frac{1 - 0.7 \cdot (E/E_c)^{1.7}}{[1 + (E/E_c)^{1.7}]^2}, \quad (5)$$

и подвижность электронов в слабом поле

$$\mu = \left. \frac{dv_d(E)}{dE} \right|_{E \rightarrow 0} = 2 \frac{v_p}{E_c}. \quad (6)$$

Тогда сопротивление сверхрешетки

$$R_{SL} = \frac{1}{qn\mu} \frac{l}{S}, \quad (7)$$

где q — заряд электрона, n — концентрация носителей заряда в сверхрешетке, l — длина сверхрешетки, $S = \pi a^2$ — площадь сверхрешетки (она же площадь омического контакта).

Сопротивление градиентных слоев сверхрешетки рассчитывалось с помощью выражения, аналогичного (7), в котором использовались концентрация и подвижность носителей заряда в градиентных слоях сверхрешетки n_{gr} и μ_{gr} , соответственно и длина градиентных слоев сверхрешетки l_{gr} .

Окончательное выражение для сопротивления омического контакта имеет вид

$$R_K = R - \frac{1}{qn\mu} \frac{l}{S} - \frac{1}{qn_{gr}\mu_{gr}} \frac{l_{gr}}{S} - \rho_{n^+} \frac{h_1}{\pi a^2} - \frac{\rho_{n^+}}{2\pi a} \arctg \frac{h_2}{a} - \frac{\rho_{n^+}}{4\pi h_2} - \frac{\rho_{n^+}}{(4/3)\pi h_2} \ln \frac{H}{a} - R_p. \quad (8)$$

Параметры градиентных слоев сверхрешетки выбирались путем усреднения по слоям и составляли: $n_{gr} = 4 \cdot 10^{18}$ см $^{-3}$, $\mu_{gr} = 450$ см 2 /В·с, $l_{gr} = 4.8 \cdot 10^{-6}$ см. Площадь контакта рассчитывалась по средней величине максимальной плотности тока $j_p = 2.5 \cdot 10^5$ А/см 2 с помощью выражения $S = I_p/j_p$, где I_p — максимальная величина тока через диод (рис. 1, с), геометрические размеры диода $h_1 = 0.1$ мкм, $h_2 = 1.5$ мкм, $H = 20$ мкм, удельное сопротивление n^+ -слоя $\rho_{n^+} = 10^{-3}$ Ом·см.

4. Результаты и обсуждение

Результаты расчета сопротивления контакта R_K для структур различной площади представлены на рис. 3 (верхняя часть). В рассмотренном массиве диодов (60 штук) преобладают диоды с площадью активной области от 2 до 6 мкм 2 . Сопротивление контакта с ростом площади уменьшается как $1/S$, поэтому целесообразно перейти к приведенному сопротивлению $R_K \times S$ контакта. На рис. 3 (нижняя часть) представлена зависимость приведенного сопротивления контакта от его площади. Усреднение по массиву диодов дает среднее значение приведенного сопротивления около

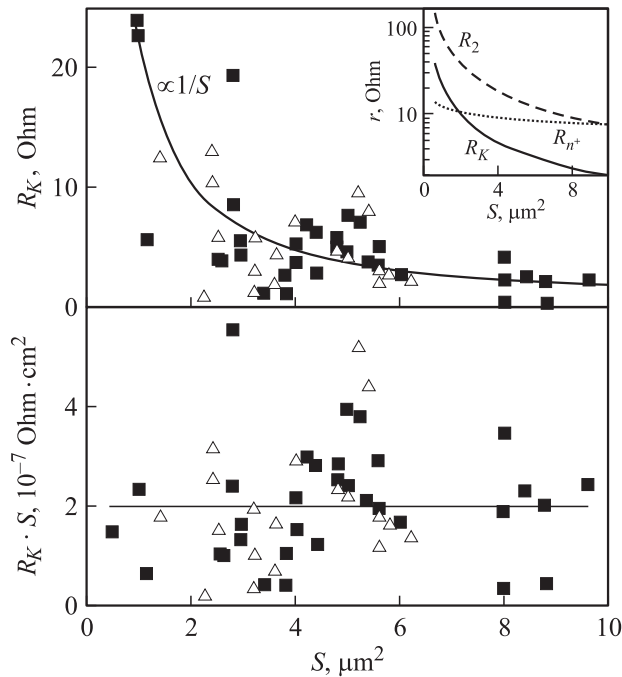


Рис. 3. Верхняя часть — зависимость сопротивления омического контакта от его площади для диодов с длиной сверхрешетки 18 периодов (треугольники) и 30 периодов (квадраты), полученная в результате обработки экспериментальных данных и путем усреднения по всему массиву диодов (сплошная линия). Нижняя часть — зависимость приведенного сопротивления омического контакта от его площади, полученная в результате обработки экспериментальных данных и путем усреднения по всему массиву диодов (обозначения те же). На вставке — зависимость контактного сопротивления (сплошная линия), сопротивления сверхрешетки (штриховая линия) и n^+ -слоя диода (пунктирная линия) от площади активной области.

$2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$. Полученное значение приведенного сопротивления находится в хорошем согласии со значениями сопротивления омических контактов, сформированных методом молекулярно-лучевой эпитаксии на основе $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ ($5 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) [24], а также InAs ($1.2 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{см}^2$) [7].

На рис. 3 (вставка) приведены результаты сравнения сопротивления омического контакта R_K с сопротивлением сверхрешетки R_2 и сопротивлением n^+ -слоя $R_{n^+} = R_1 + R_3 + R_4$. Для площадей активной области диода, меньших 2 мкм^2 , сопротивление n^+ -слоя меньше сопротивления омического контакта из-за сильной зависимости последнего от площади. Полное последовательное сопротивление диода ($R_K + R_{n^+}$) оказывается значительно меньше сопротивления сверхрешетки. С ростом площади активной области контактное сопротивление быстро уменьшается, сопротивление n^+ -слоя меняется медленно и становится сравнимым с сопротивлением сверхрешетки при $S = 10 \text{ мкм}^2$. Таким образом, использование тройного соединения InGaAs при формировании омического контакта в планарных диодах на

основе GaAs/AlAs -сверхрешетки позволило значительно уменьшить последовательное сопротивление диода по сравнению с его значением для диодов с омическим контактом на основе сплава Au-Ge . При этом предельная частота таких диодов, например, с площадью активной области 4 мкм^2 на основе сверхрешетки из 30 периодов составила приблизительно 6 ТГц.

Данные планарные диоды исследовались в схемах умножителей частоты высокой кратности [25]. Наблюдаемые спектры выходного сигнала, возникающие при облучении планарных диодов микроволновым излучением частотой 20 ТГц, содержали компоненты в диапазоне 0.3–1.0 ТГц.

Необходимо отметить, что при понижении температуры сопротивление омического контакта на основе сплава Au-Ge растет, и при криогенных температурах контакт становится выпрямляющим [15]. Контактный слой к сильно легированному GaAs на основе тройного соединения InGaAs не имеет барьера, и применение такого контактного слоя в диодах на основе GaAs/AlAs -сверхрешеток позволит использовать эти диоды в широком диапазоне температур (4–300 К). Последнее особенно важно, так как известно [26], что полупроводниковые приборы имеют значительную зависимость своих параметров от температуры, связанную с изменением подвижности носителей заряда с температурой, изменением соотношения различных механизмов эмиссии электронов из контактов. Так, арсенидгаллиевые диоды с барьером Шоттки становятся неработоспособными при их охлаждении до 4 К. В диодах на основе полупроводниковых сверхрешеток существенное уменьшение рассеяния электронов на оптических фононах с уменьшением температуры приводит к увеличению протяженности участка отрицательной дифференциальной проводимости на вольт-амперной характеристике. Можно ожидать, что это улучшит основные параметры приборов, основанных на сверхрешетках, при охлаждении и расширит их рабочий частотный диапазон. С другой стороны, работоспособность диодов в широком температурном диапазоне может быть использована для анализа динамики электронов в сверхрешетках при различных температурах.

5. Заключение

В работе обсуждались характеристики созданных планарных диодов, основанных на сильно легированных короткопериодных GaAs/AlAs -сверхрешетках. Применение в структурах тонких сильно легированных слоев InGaAs значительно уменьшает сопротивление омических контактов и позволяет увеличить предельную частоту работы диодов до терагерцового диапазона.

Работа выполнена при поддержке проекта „СВЧ устройства ТГц-диапазона на основе сверхрешеток GaAs/AlAs “ и проекта РФФИ 03-02-17088.

Список литературы

- [1] *СВЧ полупроводниковые приборы и их применение*, под ред. Г. Уотсона (М., Мир, 1972) с. 217. [Пер. с англ.: *Microwave semiconductor devices and their circuit applications*, ed. by H.A. Watson (N.Y.–Toronto–London–Sydney, McGraw-Hill Book Company, 1969)].
- [2] *Техника спектроскопии в дальней инфракрасной суб-миллиметровой и миллиметровой областях спектра*, ред. Т.М. Лифшиц (М., Мир, 1970). [Пер. с англ.: *Spectroscopic techniques for far-infrared, submillimeter and millimeter waves*, ed. by D.H. Martin (Amsterdam, North-Holland Publishing Company, 1967)].
- [3] J.A. Calviello. IEEE Trans. Electron. Dev., **ED-26**, 1273 (1979).
- [4] F. Lewen, R. Gendriesh, I. Pak, D.G. Paveliev, M. Hepp, R. Schieder, G. Winnerwischer. Rev. Sci. Instrum., **69**, 32 (1998).
- [5] F. Maiwald, F. Lewen, B. Vowinkel, W. Jabs, D.G. Paveljev, M. Winnerwischer, G. Winnerwischer. IEEE Microwaves and Guided Wave Lett., **9**, 198 (1999).
- [6] F. Maiwald, F. Lewen, V. Ahrens, M. Beaky, R. Gendriesch, A.N. Koroliev, A.A. Negirev, D.G. Paveliev, B. Vowinkel, G. Winnerwischer. J. Mol. Spectrosc., **202**, 166 (2000).
- [7] C.-I. Lin, A. Vogt, M. Rodriguez-Gironéz, A. Simon, H.L. Hartnagel. Annual Report (Technische Universitaet Darmstadt, 1998, p. 33); <http://www.hfe-technik.tu-darmstadt.de/forschung/jahreberichte/JB1998/index.php>.
- [8] S. Brandl, E. Schomburg, R. Scheuerer, K. Hofbeck, J. Grenzer, K.F. Renk, D.G. Pavel'ev, Yu. Koschurinov, A. Zhukov, A. Kovich, V. Ustinov, S. Ivanov, P.S. Kop'ev. Appl. Phys. Lett., **73**, 3117 (1998).
- [9] E. Schomburg, K. Hofbeck, R. Scheuerer, M. Haussler, K.F. Renk, A.-K. Jappsen, A. Amann, A. Wacker, E. Scholl, D.G. Pavel'ev, Yu. Koschurinov. Phys. Rev. B, **65**, 155 320 (2002).
- [10] L. Esaki, R. Tsu. IBM J. Res. and Dev., **14**, 61 (1970).
- [11] S. Winnerl, E. Schomburg, J. Grenzer, H.-J. Regl, A.A. Ignatov, A.D. Semenov, K.F. Renk, D.G. Pavel'ev, Yu. Koschurinov, B. Melzer, V. Ustinov, S. Ivanov, S. Schaposchnikov, P.S. Kop'ev. Phys. Rev. B, **56**, 10 303 (1997).
- [12] N. Braslau, J.B. Gunn, J.L. Staples. Sol. St. Electron., **10**, 381 (1967).
- [13] N. Braslau. J. Vac. Sci. Technol., **19**, 803 (1981).
- [14] C.P. Lee. Electron. Lett., **12**, 406 (1981).
- [15] K.A. Jones, E.H. Linfield, J.E.F. Frost. Appl. Phys. Lett., **69**, 4197 (1996).
- [16] R. de L. Kronnig, W.G. Penney. Proc. Royal Soc., **A130**, 499 (1931).
- [17] G. Bastard. *Wave Mechnaics Applied to Semiconductor Heterostructures* (Les Editions de Physique, 1988).
- [18] М. Шур. *Современные приборы на основе арсенида галлия* (М., Мир, 1991) с. 33. Пер. с англ.: M. Shur. *GaAs devices and circuits* (N.Y.–London, Plenum Press, 1987).
- [19] C. Jacoboni, L. Reggiani. Rev. Mod. Phys., **55**, 645 (1983).
- [20] Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц *Теоретическая физика*, т. III. *Квантовая механика. Нерелятивистская теория* (М., Наука, 1989).
- [21] W. Fawsett, D.A. Boardman, S. Swain. J. Phys. Chem. Sol., **31**, 1963 (1970).
- [22] J.G. Ruch, W. Fawsett. J. Appl. Phys., **41**, 3843 (1970).
- [23] A. Wacker, A.-P. Jauho. Superlat. Microstruct., **23**, 297 (1998).
- [24] J.M. Woodall, J.L. Freeouf, G.D. Pettit, T. Jackson, P. Kirchner. J. Vac. Sci. Technol., **19**, 626 (1981).
- [25] Д.Г. Павельев, Ю.И. Кошуринов, А.П. Васильев, С.С. Михрин, В.М. Устинов, А.Е. Жуков, П.С. Копьев. *Нанопотоника. Материалы совещания* (Н.Новгород, ИФМ РАН, 2002) с. 116.
- [26] С. Зи. *Физика полупроводниковых приборов* (М., Мир, 1984) т. 1, 2.

Редактор Л.В. Беляков

Characteristics of planar diodes on the basis of highly doped GaAs/AIAs superlattices within the THz range of frequency

D.G. Pavel'ev, N.V. Demarina, Yu.I. Koshurinov, A.P. Vasil'ev*, E.S. Semenova*, A.E. Zhukov*, V.M. Ustinov*

Lobachevskii State University,
603950 Nizhny Novgorod, Russia

* Ioffe Physicotechnical Institute,
Russian Academy of Sciences,
194021 St. Petersburg, Russia